

Capítulo 5.

Presión atmosférica

- 5.1 Definición
- 5.2 Densidad del aire
- 5.3 Variaciones en la presión atmosférica
- 5.4 Principales formaciones isobáricas
- 5.5 Uso de la presión en aviación

5.1 Definición

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el peso de la atmósfera terrestre sobre cada unidad de superficie. La presión atmosférica sobre un punto se explica por el peso del aire que se encuentran sobre ese lugar específico desde superficie hasta el tope superior de la atmósfera. A medida que se gana altura, se superan las capas más bajas –que a su vez son bastante más densas–, de tal manera que la presión disminuye con la altura. Desde el punto de vista histórico, la primera unidad empleada para medir la presión atmosférica fue el *milímetro de mercurio* (mmHg). El experimento de Torricelli que demuestra la existencia de la presión atmosférica (figura 32) consiste en lograr equilibrar el peso de la columna de aire sobre un punto, con el peso de 760 mmHg, en condiciones de una Atmósfera Estándar Internacional (ISA).

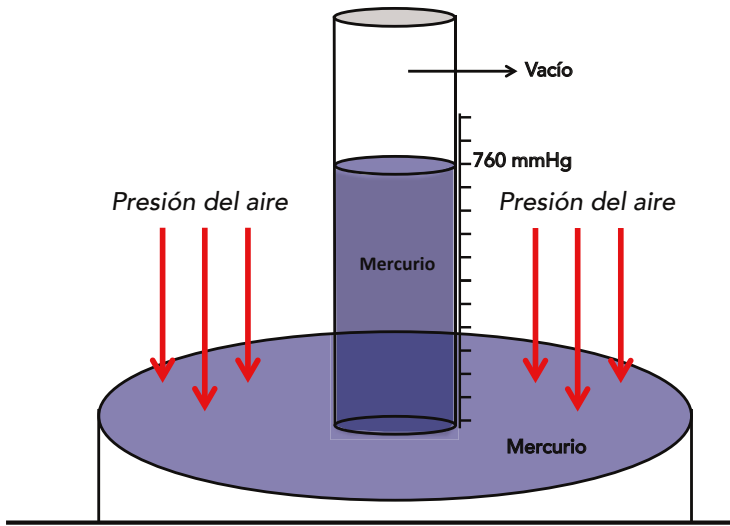


Figura 32. Experimento realizado por Torricelli.
Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, para efectos prácticos, era más conveniente pasar una unidad de longitud (mmHg) a unidades de presión (mb), utilizando las siguientes fórmulas:

- 1 $V = A h$
- 2 $M = \rho V$
- 3 $F = M a$
- 4 $P = F / S$

Donde:

V = volumen	M = masa	P = presión
A = área	ρ = densidad	S = superficie
h = altura	F = fuerza	a = gravedad



Al considerar la densidad del mercurio ($13\,595,1\text{ kg} / \text{m}^3$) y aceleración debida a la gravedad ($9,80665\text{ m} / \text{s}^2$), las unidades de longitud se convirtieron en unidades de presión, así:

$V = 0,0001\text{ m}^2\ (0,76\text{ m})$	$F = 1,0332276\text{ kg}\ (9,80665\text{ m} / \text{s}^2)$
$V = 0,000076\text{ m}^3$	$F = 10,1325\text{ N}$
$M = \rho V$	$P = 10,1325\text{ N} / \text{m}^2$
$M = 13\,595,1\text{ kg} / \text{m}^3\ (0,000076\text{ m}^3)$	$P = 10,1325\text{ N} / 0,0001\text{ cm}^2$
$M = 1,0332276\text{ kg}$	$P = 10,1325\text{ Pa}$
	$P = 1012,25\text{ hPa o mb}$

75

En Colombia, específicamente en el campo de la meteorología y la aviación, se utiliza la milésima de bar, el *milibar* (mb), el cual es equivalente a 1 000 *barias*, unidad de presión en el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS). También es usual utilizar los *hectopascales* (hPa) en meteorología y las *pulgadas de mercurio* ("Hg) en el mundo aeronáutico.

5.2 Densidad del aire

La densidad es la relación existente entre la masa de cualquier sustancia y el volumen que ocupa. Normalmente, está expresada en kg / m^3 . En el caso del aire, su densidad se afecta directamente por los cambios de presión y temperatura causados por las variaciones de altura.

De la ecuación de estado relacionada en el capítulo 2, $\rho = P / RT$, se deduce que la densidad aumenta o disminuye en relación directa con la presión e inversa con la temperatura. Si al aumentar la altura, la presión y la temperatura disminuyen pero causan con su comportamiento una reducción e incremento simultaneo sobre la densidad, ¿la densidad aumenta o disminuye con la altura? La respuesta es sencilla: la densidad disminuye con la altura, los cambios de presión influyen en mayor medida que los cambios de temperatura. La densidad afecta la sustentación, la resistencia y el rendimiento general de la aeronave.

5.3 Variaciones en la presión atmosférica

La presión atmosférica varía esencialmente por tres factores: la temperatura, la altura y la posición en la tierra.

5.3.1 Temperatura

Como se explicaba en el capítulo 2, el aire no se calienta igual en todos los sitios de la Tierra y las fuertes diferencias de temperatura causan diferencias de presiones. Cuando



una masa de aire se calienta, sus moléculas se agitan, se separan, y el conjunto se vuelve menos denso. Por ello, un mismo volumen pesará menos y presionará menos contra el suelo.

El aire cálido –que es poco denso y pesa menos que el frío– forma en superficie una zona de baja presión y tiende a ascender. Al ascender, arrastra el vapor de agua que contiene, el cual se expande, se enfría y se condensa, formando nubes.

76

Por su parte, el aire frío es más denso y pesado: sus moléculas se acercan y tiende a descender, formando en superficie zonas de alta presión que inhiben las corrientes ascendentes, con lo cual se evita la formación de nubes.

En Colombia, las principales diferencias de temperatura se producen por la variación diaria de las horas de sol, lo cual hace que la presión atmosférica varíe muy poco y se ajuste a dos máximos y dos mínimos en el día, influenciada por el comportamiento de la temperatura.

La figura 33 muestra el comportamiento horario de estas dos variables utilizando el mismo aeródromo, periodo y datos de temperatura de la figura 22. En esta ocasión, no obstante, se contrastan con los datos de presión atmosférica en superficie.

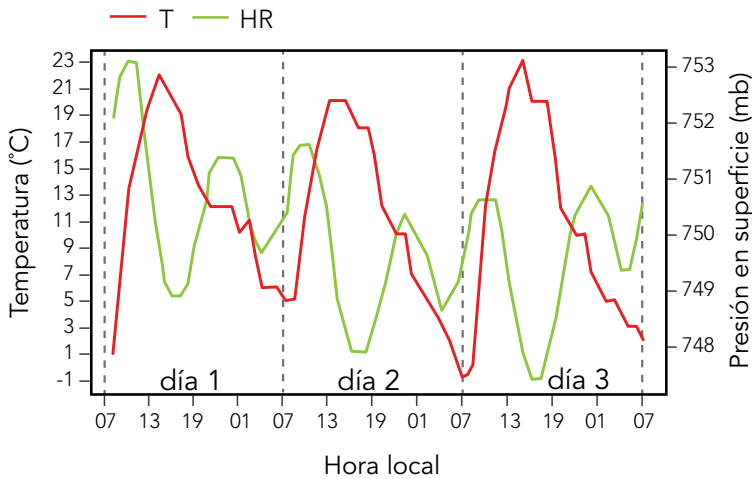


Figura 33. Temperatura vs. presión atmosférica horaria en Bogotá durante los tres primeros días de enero de 2010.

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Altura

La presión atmosférica disminuye con la altura. La disminución que experimenta la presión con la altura no es lineal; el aire es un fluido que puede comprimirse mucho, por lo que las masas de aire más próximas al suelo están comprimidas por el propio peso del aire de las capas superiores y son, por tanto, mucho más densas. Así, cerca del nivel del mar, un pequeño ascenso en altura causa una gran disminución de la presión, mientras que a gran altura hay que ascender mucho más para que la presión disminuya en la misma medida.



Como la presión atmosférica depende del peso del aire sobre un cierto punto de la superficie terrestre, cuanto más alto esté el punto, tanto menor será la presión, pues también es menor la cantidad de aire que hay sobre el punto.

La figura 34 muestra la escala de disminución de la presión con la altura en la tropósfera, donde se disminuye 1 mb por cada 9 m de altura (30 ft), o 1 "Hg por cada 1 000 ft. Si se requiere pasar mb a "Hg, se dividen los milibares entre 33,86 (factor de conversión). 33,86 es el resultado de dividir las dos presiones estándar 1013 mb y 29,92 "Hg. Sin embargo, este es un cálculo rápido que las tripulaciones deberán usar solo en tareas menores que no comprometan la seguridad del vuelo.

77

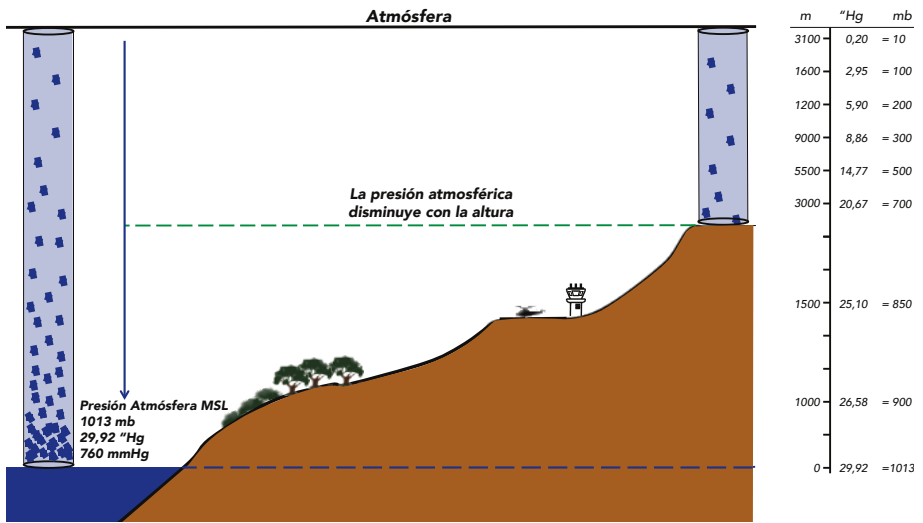


Figura 34. Comportamiento de la presión vs. altura.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente ecuación, deducida de la ecuación de estado y de la ecuación hidrostática (Wallace & Hobbs, 2006), estima la presión atmosférica de un sitio ubicado a una altura z.

$$P = 1013 \left(\frac{288 - 0,0065 z}{288} \right)^{5,26}$$

Donde:

P = Presión atmosférica en la altura z (milibares)

z = Altura en metros

288 = Temperatura en °K (°K = 15 °C + 273)

0,0065 = Gradiente medio de temperatura (0,0065 °C / m)

1013 = Presión atmosférica estándar en superficie (mb), podría utilizarse 29,92 "Hg para conocer el resultado en "Hg.

Ejemplo: Calcule la presión atmosférica para una altura de 3 000 m.



$P = 1\,013 \left(\frac{288 - 0,0065 (3000)}{288} \right)^{5,26}$	$P = 29,92 \left(\frac{288 - 0,0065 (3000)}{288} \right)^{5,26}$
Respuesta: 700 mb	Respuesta: 20,67 "Hg

Estas aproximaciones se realizan bajo condiciones atmosféricas estándar; normalmente, varían según la temperatura en superficie, el gradiente de temperatura y la latitud.

78 **Reducción de la presión por la altura**

Una pregunta frecuente de los aviadores colombianos es: *si Bogotá está a 2 600 m de elevación y la presión disminuye con la altura, por qué el QNH del aeropuerto oscila alrededor de 30,37 "Hg, mientras que el de Cartagena fluctúa alrededor de los 29,92 Hg?*

La respuesta es que el QNH hace referencia a la presión altimétrica reducida o ajustada al nivel medio del mar. Es la presión atmosférica de Bogotá como si no existieran los 2 600 m de elevación que la caracterizan y hubiera que sumarle la presión que ejerce el peso de esa columna de aire (2 600 m) para –imaginariamente– colocar el aeropuerto al nivel del mar. En otras palabras, el QNH indica la presión atmosférica que tendría Bogotá si el aeropuerto se encontrara al nivel medio del mar.

Ahora bien, la presión atmosférica real de Bogotá varía alrededor de los 22,15 "Hg; sin embargo, las torres de control nunca dan a las tripulaciones presión atmosférica, pues en aeronáutica se trabaja únicamente con presión altimétrica.

La figura 35 presenta un ejemplo de los datos de presión atmosférica y altimétrica en Bogotá del 17 al 19 de marzo de 2014. En ella, puede observarse claramente la diferencia que existe entre las dos variables.

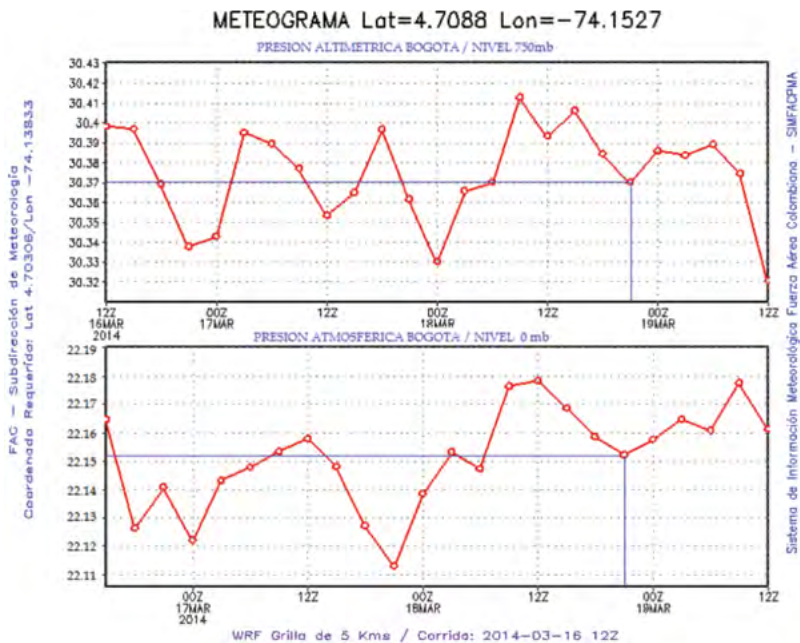


Figura 35. Diferencias entre presión altimétrica y atmosférica en Bogotá.
Fuente: Tomado de SIMFAC (s.f.).



La presión atmosférica es la presión medida directamente por un barómetro. Se reduce la presión atmosférica al nivel medio del mar para poder comparar aeropuertos con diferentes elevaciones. Cuando se comparan todos los aeropuertos, como si las montañas no existieran y todos estuvieran ubicados justo sobre el nivel medio del mar, la presión atmosférica pasa a ser presión altimétrica, reducida o ajustada al nivel medio del mar. Normalmente, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{msl} = \frac{P_{sfc}}{\exp\left(-\frac{gz}{RT_m}\right)}$$

79

Usando propiedades de \exp^{11} , donde $\exp(x) = \frac{1}{\exp(-x)}$. La anterior ecuación también puede escribirse como:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP}\left(\frac{gz}{RT_m}\right) \right]$$

Donde:

P_{msl} = QNH, o presión reducida a nivel del mar

P_{sfc} = QFE, o presión atmosférica de superficie medida en la estación por un barómetro

g = aceleración de la gravedad ($9,80617 \text{ m} / \text{s}^2$)

R = constante de los gases ($287,04 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$)

z = elevación de la estación (en metros)

T_m = temperatura media = $T_k - \left(\frac{0,0065 z}{2}\right)$

T_k = temperatura en superficie ($^{\circ}\text{K}$)

Suponiendo que se desea comparar la presión altimétrica registrada en dos ciudades diferentes, debe reducirse la presión en cada una de ellas. De manera analítica y gráfica, en el siguiente ejemplo (figura 36) se muestra cómo se reducen las presiones de las ciudades de Cúcuta (a 300 m sobre el nivel del mar) y Bogotá (2 600 m sobre el nivel del mar), con el único fin de poder comparar las diferencias de presión entre las dos ciudades sin que el resultado sea influenciado por el terreno (elevación).

Cúcuta	Bogotá
Temperatura (sfc) = 25 °C = 298 °K	Temperatura (sfc) = 15 °C = 288 °K
Elevación (z) = 300 m	Elevación (z) = 2600 m
$P_2 = 28,95 \text{ "Hg}$	$P_2 = 22,15 \text{ "Hg}$
$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 z}{T_m}$	$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 z}{T_m}$
$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 (300)}{297,025}$	$P_{msl} = (P_{sfc}) \text{ Exp } \frac{0,034 (2600)}{297,55}$
$P_{msl} = (28,95) (0,0343)$	$P_{msl} = (22,15) (0,031)$
$P_{msl} = 29,25$	$P_{msl} = 30,38$

11 EXP es la función exponencial e, el cual se trata de un número irracional; tiene infinitas cifras decimales y no es periódico. Su valor es 2,718281 (...) en sus seis primeras cifras decimales. La función exponencial que tiene por base el número e se escribe como $y = \exp(x)$. Esto significa que y es igual a e elevado a la potencia x .



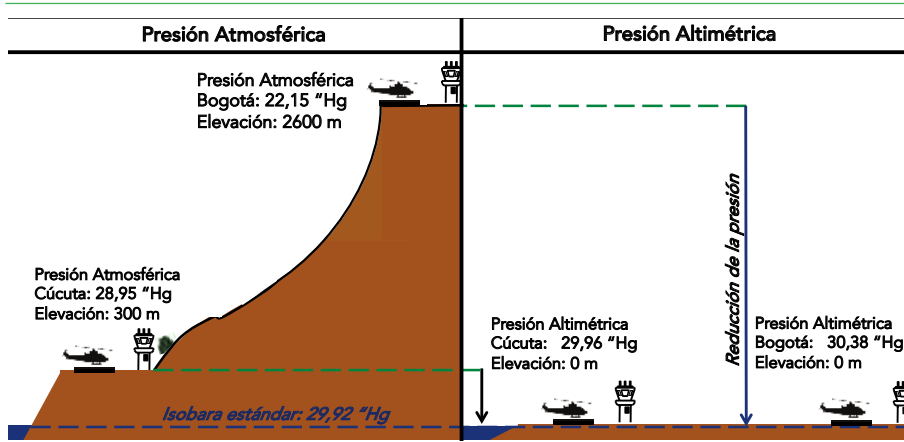


Figura 36. Reducción de la presión eliminando la elevación del punto.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la demostración anterior nos indican que, sobre el área donde se encuentra ubicada Bogotá, hay mayor presión atmosférica (alta) que sobre el área del aeropuerto de Cúcuta (baja).

Para el estudio de las condiciones meteorológicas en un área amplia, es muy útil comparar las presiones simultáneas en diversos puntos de dicha área. La comparación no puede hacerse directamente porque los valores de la presión están poderosamente influenciados por la elevación de cada lugar. Un mapa de este tipo sólo permitiría ver terrenos altos y llanos –es decir, valores de presión atmosférica–, sin dar ningún indicio de dónde pueden encontrarse malas condiciones atmosféricas.

Al reducir las presiones atmosféricas al nivel del mar y graficar isobaras (líneas imaginarias que unen puntos de igual presión) sobre un mapa, pueden detectarse áreas de presión alta y baja, así como sus variaciones en el tiempo. De esta manera, se facilita la asociación de presión baja a mal tiempo y de presión alta a buen tiempo.

5.3.3 Posición en la Tierra

La altura de tropósfera varía entre 9 y 20 km según su ubicación en el ecuador o los polos, respectivamente. Esta desigualdad en la masa de aire ejerce diferente peso sobre los puntos de la Tierra según corresponda su latitud y, por lo tanto, diferente presión atmosférica. Teniendo en cuenta lo anterior, el experimento de Torricelli en una atmósfera ISA fue realizado a los 45° de latitud, punto medio entre el ecuador y los polos.



5.4 Principales formaciones isobáricas

Las principales formaciones isobáricas (figura 37) son:

81

Baja presión: sistema atmosférico donde la presión más baja está concentrada en el centro del patrón; se asocia a inestabilidad atmosférica y mal tiempo. Se denota con una "B" (o "L", en inglés) en el centro del sistema. Este tipo de formación isobárica también es conocido como ciclón. Aunque *ciclón* y *anticiclón* en realidad se asocian a la dirección de la rotación del viento en un sistema de circulación cerrado, en la práctica terminan usándose de forma indistinta.

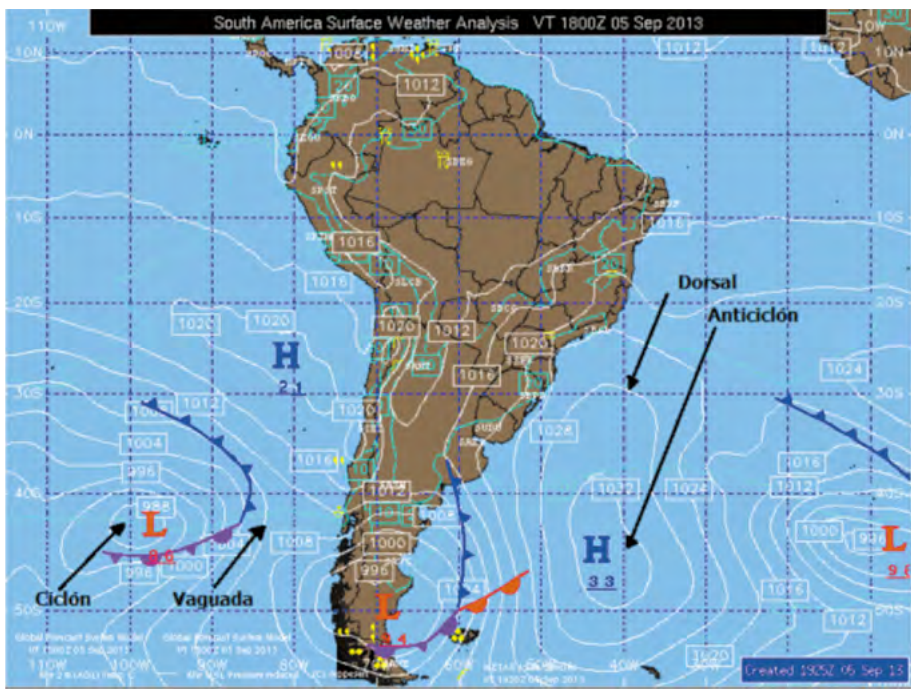


Figura 37. Formaciones isobáricas.
Fuente: Modificado de JetPlan (s.f).

Alta presión: zona de alta presión donde la presión más alta se encuentra en el centro del patrón. Se le representa con la letra A (o H en inglés). En esta zona, la estabilidad atmosférica es alta puesto que el movimiento del aire es descendente, lo cual evita la formación de nubosidad.

Vaguada (surco): en los mapas de superficie se puede ver cómo, a partir del centro de una baja presión, las isobaras se deforman y alejan más del centro de un lado que en cualquier otra dirección. Este fenómeno se asocia usualmente a mal tiempo.



Dorsal (cuña): es un área elongada, de presión atmosférica relativamente alta, donde a partir del centro de una alta presión las isobaras se deforman y alejan más del centro de un lado que en cualquier otra dirección. Este fenómeno generalmente se asocia a buen tiempo dada su baja humedad (más información referente a formaciones isobáricas puede encontrarse en el capítulo 14).

5.5 Uso de la presión en aviación

La presión es la variable atmosférica más utilizada por las aeronaves. La diferencia de presión entre dos puntos permite medir distancias verticales en forma indirecta. En aviación se emplean los altímetros, instrumentos que miden las diferencias de presiones entre un nivel de referencia y el medido por el instrumento a bordo de la aeronave, convirtiéndolos en valores aproximados de altitud.

Los servicios de tránsito aéreo (ATS) transmiten a los pilotos la presión de referencia a través del código Q, una colección estandarizada de mensajes de tres letras con información requerida para el desarrollo seguro del vuelo. Estos son: nivel de vuelo (QNE), altura (QFE) y altitud (QNH). Más información puede consultarse en el capítulo 6 sobre altimetría.

Los instrumentos basados en la medición o cambios de presión del aire son:

- Velocímetro, anemómetro o indicador de velocidad.
- Altímetro, o indicador de altura.
- Variómetro, o indicador del régimen de cambio de altura, en ascenso o descenso.

Las mediciones se realizan con el tubo *Pitot* y las tomas o medidores de presión estática. Estos instrumentos son capaces de proporcionar información del movimiento del avión en la masa de aire. Su principal función es proporcionar al piloto la información necesaria para mantener la aeronave estable y desarrollar el vuelo de forma segura.

